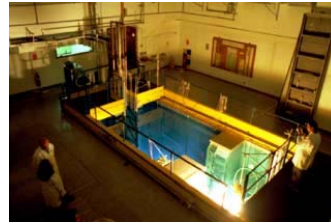




Materiais e Ciclo do Combustível

## FUNDAMENTOS DE TECNOLOGIA NUCLEAR



Profs.:  
Afonso Aquino e  
Araldo Andrade



*ipen*  
2007

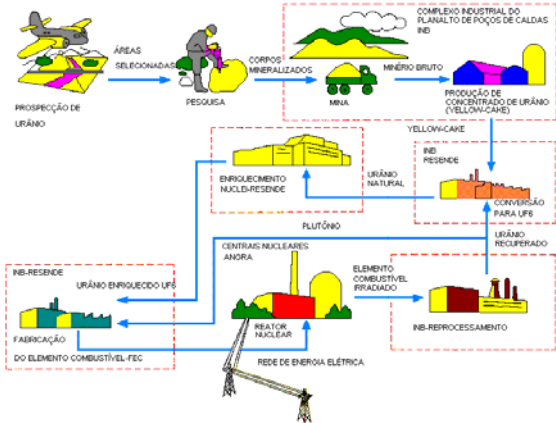


## Tópicos do Módulo

---

- Noções sobre o Ciclo do Combustível Nuclear
- Materiais e Componentes de uma Central Nuclear
- Requisitos e Propriedades dos Materiais para Reatores
- Noções básicas sobre Ciência e Engenharia dos Materiais
- Efeitos da Radiação nos Materiais da Engenharia
- Destaque para alguns Materiais Nucleares

# Ciclo do Combustível Nuclear



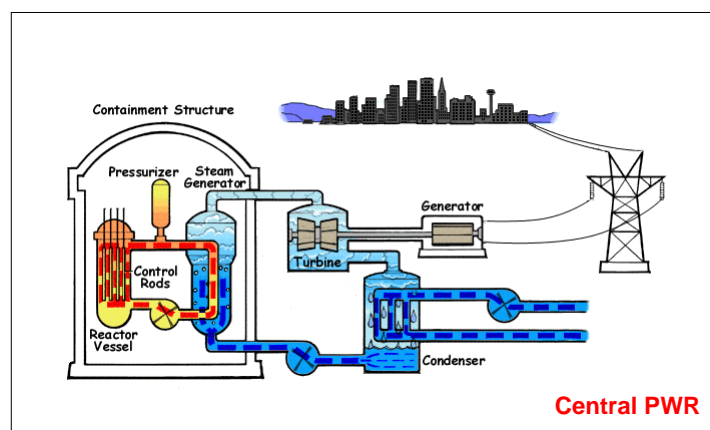
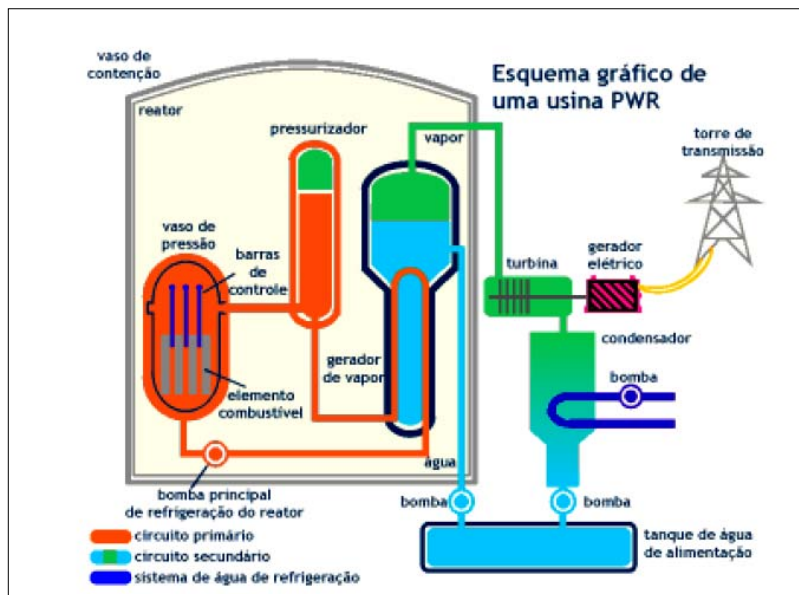
Central Nuclear de Angra dos Reis

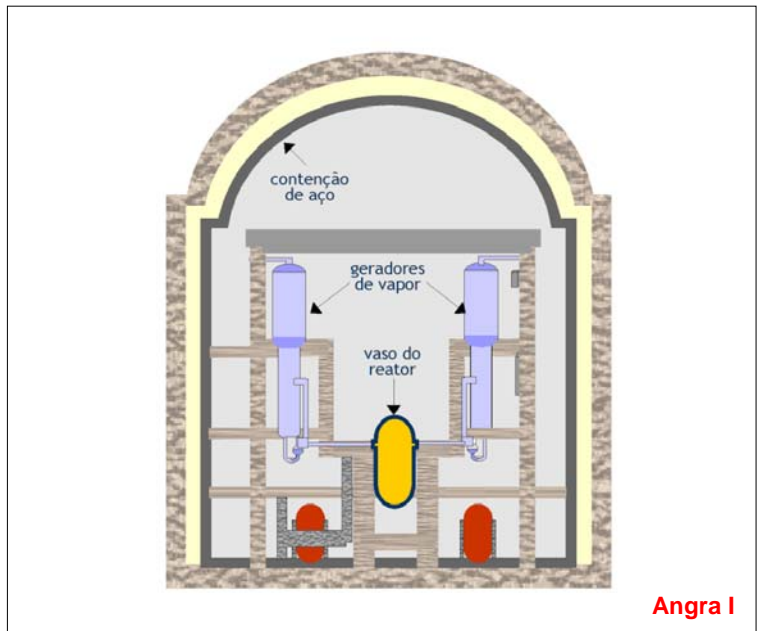




Angra – Unidade 3







Angra I



Vaso de Pressão



Condensador de Vapor

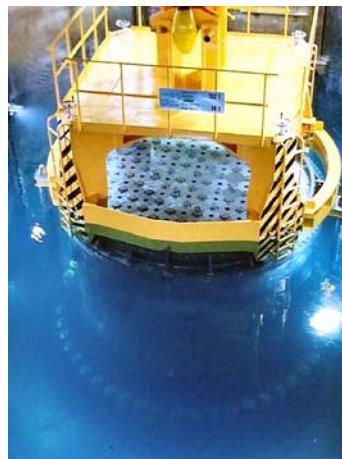


Gerador de Vapor

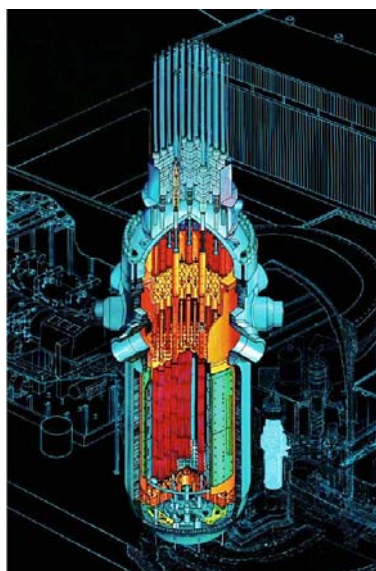


Pressurizador





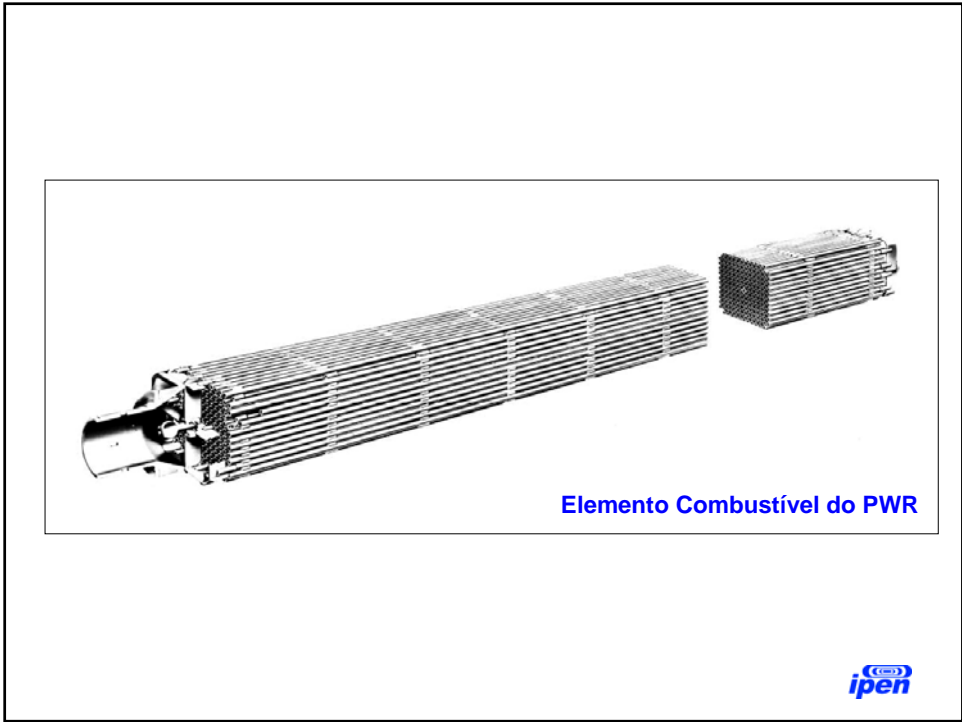
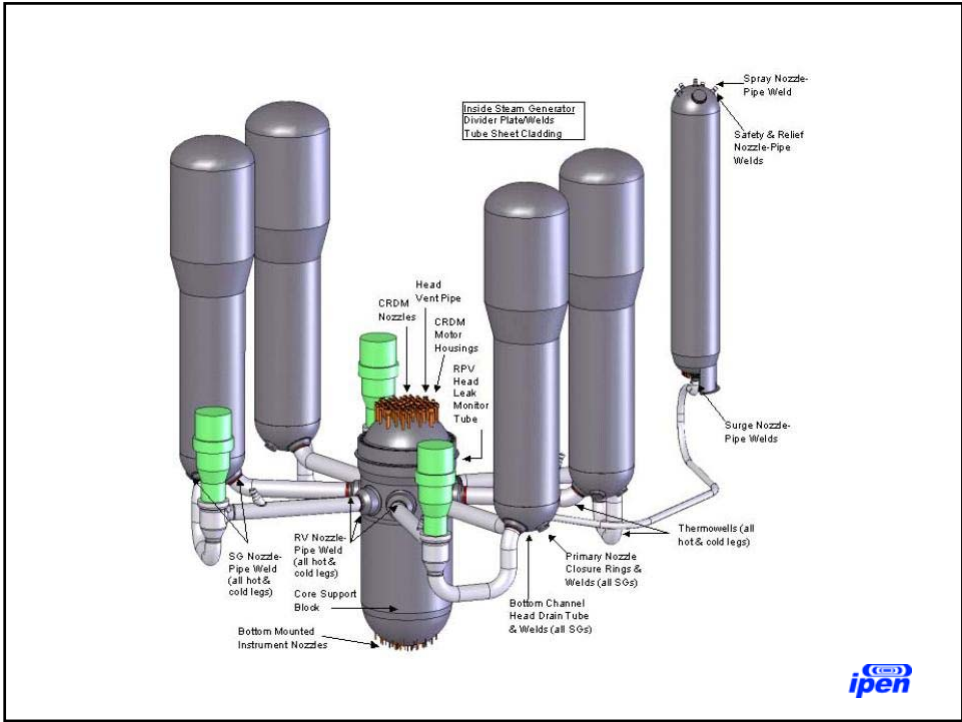
Vaso de Pressão



Vaso de Pressão

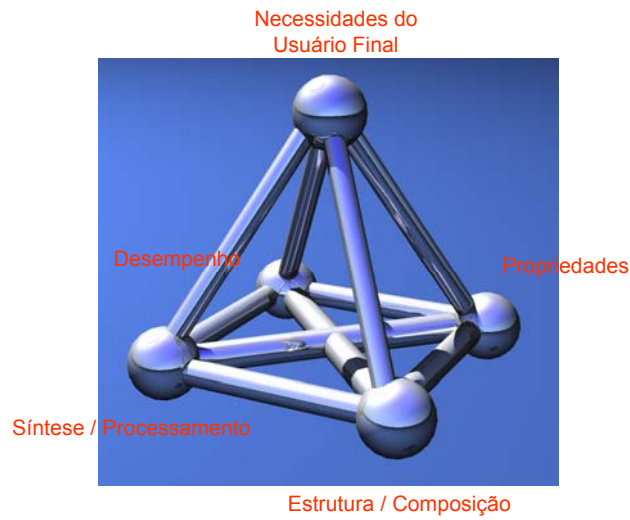






## A Pirâmide dos Materiais

---



## Seleção de Materiais

---

- Necessidade de escolha dos materiais mais apropriados para cada tipo de reator nuclear, orientada por especificações de projeto, tempo de serviço e demanda operacional de modo a garantir seu bom desempenho



## Fatores a considerar

---

- Propriedades Nucleares
- Propriedades Físicas
- Propriedades Mecânicas
- Propriedades Químicas
- Estabilidade à Irradiação
- Custo
- Reprocessamento



## Propriedades Gerais

---

- **Mecânicas**
  - Resistência
  - Ductilidade
  - Tenacidade
  - Integridade Estrutural
- **Fabricação**
  - Conformabilidade
  - Soldabilidade
  - Usinabilidade
- **Químicas**
  - Resistência à Corrosão
  - Compatibilidade Química
- **Térmicas**
  - Coeficientes de Transferência de Calor
- **Disponibilidade e Custo**



## Propriedades Específicas

- **Neutrônicas**
  - Secção de choque de captura
  - Secção de choque de fissão
  - Razão e poder de moderação
- **Radioatividade Induzida**
  - Produção de emissores de raios  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$
  - Geração de calor
- **Estabilidade à Irradiação**
  - Inchamento (*swelling*)
  - Fluência (*creep*)
  - Fadiga (*ciclagem térmica*)
  - Fratura
- **Interação Química e Interdifusão**
- **Facilidade de Reprocessamento do Combustível**



## Exemplo de aplicação \*



Rígido; Forte; Tenaz; Leve (OK!!)



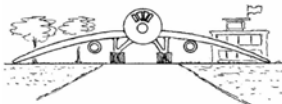
Não suficientemente rígido (necessita  $> E$ )



Não suficientemente forte (necessita  $> \sigma_e$ )



Não suficientemente tenaz (necessita  $> K_{Ic}$ )



Muito pesado (necessita  $< \rho$ )



## Componentes e Materiais Primários utilizados nos Reactores Nucleares

---

- Combustíveis Nucleares
- Materiais Estruturais
- Moderadores, Refletores e Cobertores
- Elementos de Controle
- Refrigerantes
- Blindagens
- Sistemas de Segurança



## Componentes e Materiais

---

| Componente            | Principais Materiais   |
|-----------------------|--|
| Combustível nuclear   | urânio, plutônio, tório  |
| Estruturais           | ligas de zircônio; aço inoxidável; ligas de alumínio; ligas de níquel                      |
| Moderador e refletor  | grafite, água leve e pesada, berílio   |
| Cobertor e refletor   | U empobrecido, Th, Be, grafite   |
| Elementos de controle | carbeto de boro, cádmio, háfnio, ácido bórico, absorvedores queimáveis                     |
| Refrigerantes         | hélio, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, D <sub>2</sub> O, metais líquidos               |
| Blindagens            | Elementos ou compostos de número atômico baixo, leve ou pesado                             |
| Sistemas de Segurança | Sistemas de supressão de pressão, de resfriamento emergencial do núcleo, de monitoramento; |



## Materiais Combustíveis

---

- Função: Fonte de Energia
  - Urânio (U) : metálico e cerâmico
  - Plutônio (Pu): diluído no urânio na forma metálica ou cerâmica
  - Tório (Th): material fértil; ligas metálicas e compostos cerâmicos



## Materiais Estruturais

---

- Função: proporcionar confinamento físico (do combustível), resistência mecânica e suporte estrutural aos componentes do reator
  - Encamisante
  - Vaso de Pressão
  - Canais e tubos de refrigeração do combustível
  - Placas de suporte do núcleo



## Materiais Estruturais

---

| Requisitos  | materiais   |
|---|---|
| Baixa absorção (captura) de nêutrons                | Be, Mg, Zr, Al  |
| Alta resistência mecânica e ductilidade             | Aço carbono, aço inoxidável                                 |
| Alta estabilidade sob irradiação                    | Mo, Ti, Ta, W   |
| Boa resistência a corrosão em temperaturas elevadas | Grafite, concreto protendido                                |
| Boa condutividade térmica                           | Al, Mg  |
| Baixa radioatividade induzida                       | BeO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> |



## Propriedades de Elementos Metálicos de Aplicação Estrutural

---

| elemento | Peso atômico (u.m.a.) | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Seção de choque de absorção |          | Seção de choque de espalhamento (barns) | Ponto de fusão (°C) |
|----------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------|---|---------------------|
|          |                       |                                | Absoluta (barns)            | relativa |   |                     |
| Be       | 9,01                  | 1,85                           | 0,0095                      | 1,0      | 7,0                                     | 1283                |
| Mg       | 24,31                 | 1,74                           | 0,063                       | 6,6      | 4,0                                     | 650                 |
| Zr       | 91,22                 | 6,50                           | 0,180                       | 19,0     | 8,0                                     | 1845                |
| Al       | 26,98                 | 2,70                           | 0,235                       | 24,7     | 1,4                                     | 660                 |
| Nb       | 92,91                 | 8,57                           | 1,100                       | 116      | 5,0                                     | 2415                |
| Mo       | 95,94                 | 10,20                          | 2,600                       | 274      | 7,0                                     | 2617                |
| Fe       | 55,85                 | 7,87                           | 2,530                       | 267      | 11,0                                    | 1539                |
| Cr       | 52,00                 | 7,19                           | 3,100                       | 326      | 3,0                                     | 1990                |
| Cu       | 63,54                 | 8,96                           | 3,800                       | 400      | 7,2                                     | 1083                |
| Ni       | 58,71                 | 8,91                           | 4,600                       | 485      | 17,5                                    | 1455                |
| V        | 50,94                 | 6,10                           | 4,900                       | 516      | 5,0                                     | 1736                |
| Ti       | 47,90                 | 4,51                           | 6,100                       | 642      | 4,0                                     | 1725                |
| Mn       | 54,94                 | 7,43                           | 13,300                      | 1400     | 2,3                                     | 1245                |
| W        | 183,85                | 19,2                           | 19,000                      | 2000     | 5,0                                     | 3410                |



## Materiais usados na construção de reatores a fissão

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| U, Pu, Th                           | Elementos férteis e fissionáveis, usados geralmente como ligas, cerâmicas ou cermet   |
| Al, Mg, Zr, Be, C                   | Elementos com baixa secção de choque de captura de neutrons térmicos. Podem ser usados como encamisantes de reatores térmicos. Carbono e Be também podem ser usados para moderadores e refletores |
| Aços de construção (Fe, Ni, Cr, Mn) | Vão desde os aços doces para os vasos de pressão até os aços ferríticos ou totalmente austeníticos para a estrutura do núcleo   |
| B, Hf, Cd, Ag, Gd                   | Elementos com secção de choque de absorção extremamente elevada para barras de controle   |



## Materiais Cerâmicos em Reatores Nucleares

| Combustível                    | Fértil            | Moderador Refletor | Estrutura                      | Controle Absorvedores          | Blindagem                      | Sistema de segurança Isolamento |
|--------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| UO <sub>2</sub>                | ThO <sub>2</sub>  | Grafite            | Grafite                        | B <sub>4</sub> C               | Concretos                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  |
| U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | ThSi <sub>2</sub> | BeO                | BeO                            | HfC                            | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | ZrO <sub>2</sub>                |
| PuO <sub>2</sub>               |                   | ZrH                | MgO                            | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Vidro (Na)                     | MgO                             |
| U <sub>2</sub> C <sub>3</sub>  |                   | Be <sub>2</sub> C  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> |                                 |
| UC                             |                   |                    | ZrO <sub>2</sub>               | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO                            |                                 |
| UN                             |                   |                    | SiO <sub>2</sub>               | HfO <sub>2</sub>               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                 |
| UAl <sub>x</sub>               |                   |                    | ZrSi <sub>2</sub>              | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> |                                |                                 |
| U <sub>3</sub> Si              |                   |                    | Concreto                       | Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                |                                 |
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> |                   |                    | Protendido                     |                                |                                |                                 |

*Intermetálicos*





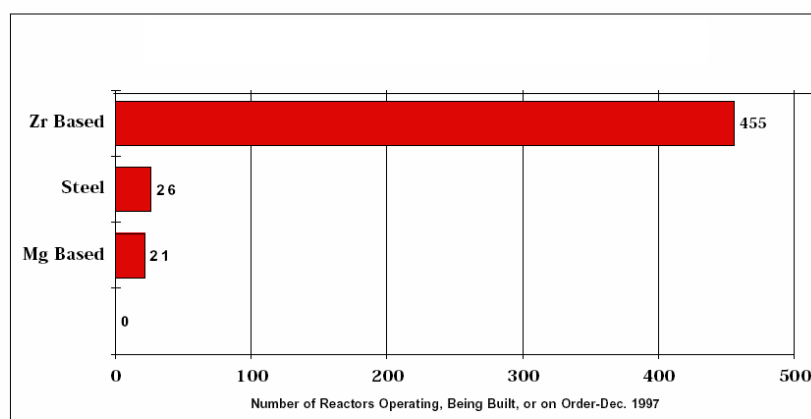
## Atributos do encamisante (revestimento)\*

- Limite de escoamento adequado em T elevada e durante a irradiação
- Resistência à corrosão
- Estabilidade dimensional
- Propriedades mecânicas previsíveis
- Condutividade térmica elevada
- Boas propriedades neutrônicas
- Facilidade de fabricação e instalação
- Facilidade de reprocessamento
- Custo baixo
- Baixa demanda de recursos escassos

\* o combustível de ser protegido do refrigerante e vice-versa



## Aproximadamente 90% dos Reatores a Fissão Atuais usam Materiais do Revestimento baseados no Zr



Revestimento/Encamisante



## Zircônio como Material Estrutural Nuclear

---

| vantagens  | desvantagens  |
|--|---|
| Baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos | Baixa condutividade térmica                           |
| Alto ponto de fusão                                    | Baixa resistência à corrosão em temperaturas elevadas |
| Resistência mecânica alta em temperaturas elevadas     | Custo relativamente alto                              |
| Boa resistência a corrosão (água e vapor)              | Baixo coeficiente de expansão térmica                 |
| Conformabilidade e usinabilidade                       |   |
| Disponibilidade razoável                               |   |



## Alumínio como Material Estrutural Nuclear

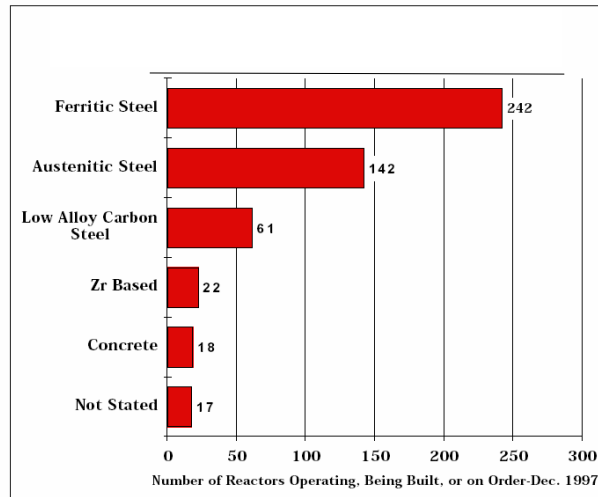
---

| vantagens   | desvantagens  |
|---|---|
| Absorção de nêutrons térmicos relativamente baixa | Baixo ponto de fusão                                |
| Condutividade térmica elevada                     | Resistência mecânica baixa em temperaturas elevadas |
| Alta estabilidade sob irradiação                  |   |
| Boa resistência a corrosão (água e ar)            |   |
| Conformabilidade e soldabilidade                  |   |
| Disponibilidade e baixo custo                     |   |



*Aproximadamente 90% dos Reatores a Fissão Atuais usam  
Aço para o Vaso de Pressão*

---



*Atributos do material do moderador*

---

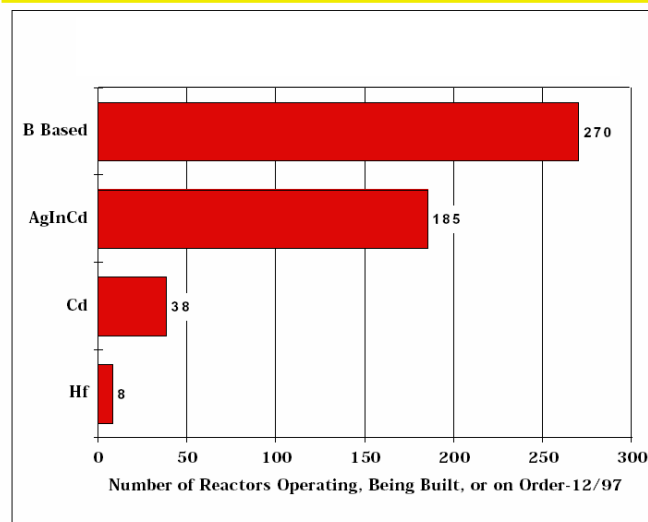
- Secção de choque de espalhamento elevada
- Secção de choque de absorção baixa
- Perda de energia por colisão alta

## Atributos dos Materiais das Barras de Controle

- Secção de choque de absorção elevada
- Resistência mecânica adequada para barras sólidas
- Baixa massa para permitir movimentação rápida
- Resistência à corrosão
- Estabilidades química e dimensional
- Baixo custo
- Boa capacidade de transferência de calor



## Aproximadamente Metade dos Reactores à Fissão Atuais usa Varetas de Controle baseados no Boro



## Atributos do refrigerante para reatores a fissão

---

- Condutividade Térmica elevada
- Calor Específico elevado
- Estabilidade (sob irradiação, à temperatura)
- Radioatividade Induzida baixa
- “Corrosividade” baixa

## Atributos do Material de Blindagem

---

- Bom material de moderação
- Bom absorvedor de neutrons
- Densidade elevada para atenuar radiação gama

### Possíveis Materiais:

Cimentos e concretos; cerâmicas e cermets; vidros e sais fundidos; minerais; ligas metálicas e pós sinterizados; polímeros, etc